

<https://doi.org/DOI:10.30857/1813-6796.2018.6.8>

УДК 621.791.52:  
620.193.013

НИРКОВА Л. І.<sup>\*</sup>, ЛАБУР Т.М.<sup>\*</sup>, РЯБИКО О. М.<sup>\*\*</sup>,  
БОРИСЕНКО Ю. В.<sup>\*\*</sup>

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України\*  
Київський національний університет технологій та дизайну\*\*

### КОРЕЛЯЦІЯ МІЖ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ СИСТЕМИ Al-Mg-Cu-Si ТА ЙОГО СТІЙКІСТЮ ПРОТИ ЛОКАЛЬНОЇ КОРОЗІЇ

**Мета.** Дослідження кореляції між електрохімічними властивостями зварного з'єднання алюмінієвого сплаву системи легування Al-Mg-Cu-Si та його стійкістю проти локальної корозії.

**Методика.** Застосовували методи потенціометрії, поляризаційних кривих, прискорені випробування стійкості проти міжкристалітної корозії згідно з ГОСТ 9.913. Застосовували такі засоби виміральної техніки: ваги аналітичні ВРЛ 200, потенціостат ПП-50.1.

**Результати.** Визначено електрохімічні властивості в розчині 3% NaCl зварного з'єднання алюмінієвого сплаву системи легування Al-Mg-Cu-Si, отриманого вільною дугою, та оцінено його стійкість проти міжкристалітної корозії. Результатами електрохімічних досліджень встановлено, що потенціал зварного шва та зони термічного впливу є більш благородними порівняно з основним металом. Зважаючи на більшу площу основного металу в конструкції порівняно із зварним швом (площа зварного шва становить не більше 10% від площі основного металу) в цілому можна очікувати задовільну стійкість зварного з'єднання проти суцільної корозії. Максимальна глибина міжкристалітної корозії біляшовної зони сплаву Al-Mg-Cu-Si становить близько 0,350 мкм, що більше ніж для основного металу – близько 0,086 мкм. Збільшення глибини руйнування границь зерен у зварному з'єднанні підтверджує факт розміцнення біляшовної зони під час зварювання.

**Наукова новизна.** Встановлено кореляцію між електрохімічними характеристиками зварного з'єднання алюмінієвого сплаву системи легування Al-Mg-Cu-Si, отриманого вільною дугою, а саме потенціалом корозії та струмом анодного розчинення в активній області потенціалів та стійкістю проти міжкристалітної корозії. Показано, збільшення глибини міжкристалітної корозії біляшовної зони корелює з більшими струмами анодного розчинення в ній.

**Практична значимість.** Встановлено, що термічний цикл зварювання сприяє зменшенню біляшовної зони зварного з'єднання, отриманого вільною дугою, алюмінієвого сплаву системи легування Al-Mg-Cu-Si, що призводить до зниження стійкості проти міжкристалітної корозії.

**Ключові слова:** алюмінієвий сплав системи легування Al-Mg-Cu-Si, зварне з'єднання, електрохімічні властивості, міжкристалітна корозія.

**Вступ.** Алюміній та його сплави є одними з основних конструкційних матеріалів, які широко застосовуються в аерокосмічній галузі, водному транспорті, будівництві, тощо. Для підвищення міцності до складу алюмінію вводять легуючі домішки [1-2]. Сплави системи Al-Mg-Cu-Si відносяться до алюмінієвих сплавів, що деформуються та термічно зміцнюються. Ці сплави характеризуються поєднанням високої технологічності, корозійної стійкості та високої міцності. Перспективним сплавом цієї системи є сплав марки В-1341. Слід відзначити, що властивості алюмінієвих сплавів, що термічно зміцнюються, залежать від швидкості охолодження виробу при гартуванні, що впливає на структуру і рівень залишкових напружень. Зниження конструкційної міцності, стійкості проти міжкристалітної корозії, що спостерігається при уповільненому охолодженні під час гартування, пов'язано з утворенням нерівновісних виділень, зон вільних від виділень, а також зниженням частки включень зміцнюючої фази [3].

Велика кількість науково-дослідних робіт, в цілому, направлена на вивчення закономірностей впливу їх складу на структуру, фазовий склад та механічні властивості. Представляють інтерес роботи, направлені на вивчення причин міжкристалітної корозії та дослідження підходів для її зменшення [4]. Тому робота представляє дослідницький інтерес та є актуальною.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є дослідження зв'язку між електрохімічними властивостями зварного з'єднання сплаву В1341 в розчині 3 % хлориду натрію та стійкістю проти міжкристалітної корозії. Об'єктом дослідження є зварне з'єднання алюмінієвого сплаву системи легування Al-Mg-Cu-Si, який відноситься до сплавів, що термічно зміцнюються.

**Результати дослідження.** Дослідження проводили на зварному з'єднанні алюмінієвого сплаву системи легування Al-Mg-Cu-Si. Хімічний склад сплаву (у ваг. %): (0,45-0,9) Mg, (0,5-1,2) Si, (0,15-0,35) Mn, (0,1-0,5) Cu, (0,05-0,1) Ca, 0,25 Cr, 0,2 Zn, 0,15 Ti, 0,5 Fe, інші елементи не більше 0,1. Зварне з'єднання отримували вільною дугою на оптимальному режимі:  $I_{зв} = 54 \div 56$  А,  $U_d = 11,1 \div 12,4$  В, при якому утворюється щільний шов без дефектів, рис. 1.

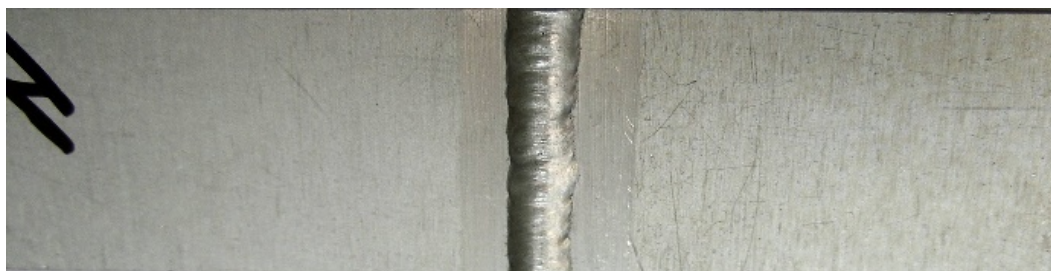
Для дослідження впливу термічного циклу зварювання на електрохімічну гетерогенність зон зварного з'єднання аналізували розподіл потенціалів по поверхні зразка. Метод використовується для попередньої оцінки імовірності переважного руйнування більш активної зони зварного з'єднання при контакті з корозійно-агресивним середовищем.

Встановлено, що потенціал корозії основного металу (ОМ) є більш негативним порівняно зі зварним швом (ЗШ) та зоною термічного впливу (ЗТВ): різниця становить близько 0,095 В та 0,025 В, відповідно.

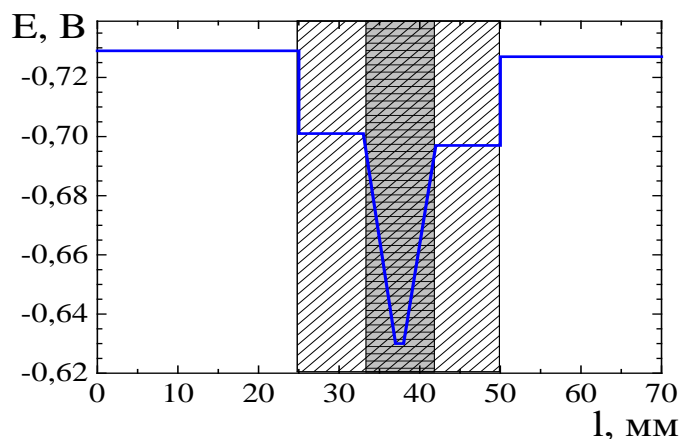
Згідно з ГОСТ 9.005 (пункт 4.4.5) [5] в зварних конструкціях різниця потенціалів між зварним швом і основним металом не повинна перевищувати 30-50 мВ. Тобто, термодинамічно ймовірно, що при контакті з корозійно-агресивним середовищем можна очікувати переважного руйнування основного металу. Але, у зв'язку з його більшою площею у виробі, така різниця не є небезпечною і, в цілому, не сприятиме погіршенню корозійної стійкості зварного з'єднання при контакті з корозійно-активним середовищем. Але треба мати на увазі, що стійкість зварного з'єднання проти локальної корозії, в умовах сумісного впливу корозійного середовища та напружень, може відрізнятись.



а



б



ис.1. Зовнішній вигляд області зварного шва сплаву системи Al-Mg-Cu-Si, отриманого ручним зварюванням вільною дугою (1) та розподіл потенціалів по поверхні (2): а – лицьова поверхня шва, б – корінь шва

Досліджено електрохімічні властивості основного металу та зварного шва при анодній та катодній поляризації. Поляризаційні криві знімали в потенціодинамічному режимі зі швидкістю розгорнення потенціалу  $5 \times 10^{-4}$  В/с в розчині 3 % NaCl (рис. 2).

З поляризаційних кривих визначено та обчислено такі електрохімічні параметри: струм в області активного анодного розчинення, тафелівський нахил, граничний дифузійний струм, потенціал початку виділення водню (табл. 1).

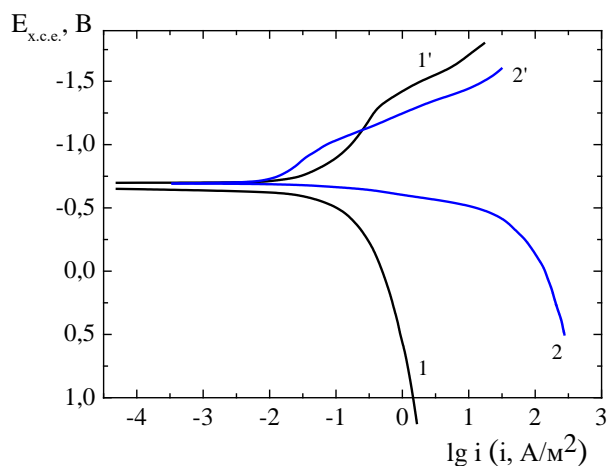


Рис. 2. Поляризаційні криві, зняті на основному металі та зварному шві зварного з'єднання системи Al-Mg-Cu-Si: 1 – основний метал; 2 – зварний шов

Таблиця 1

**Електрохімічні параметри анодного процесу різних зон зварного з'єднання алюмінієвого сплаву В1341Т**

Зона зварного з'єднання	Електрохімічні параметри				
	$E_{cor}$ , В	$b_a$ , В	$i_{-0,55В}$ , А/м <sup>2</sup>	$i_{O_2}$ , А/м <sup>2</sup>	$E_{H_2}$ , В
Основний метал	-0,721...-0,727	0,025	0,057	0,210	-1,31
Зварний шов	-0,628...-0,630	0,014	3,42	0,029	-0,96

З аналізу анодної кривої встановлені наступні особливості поведінки. Довжина області активного анодного розчинення для металу шва становила близько 160 мВ, основного металу – близько 100 мВ. Струми в активній області на ЗШ був майже на 2 порядки більше, ніж ОМ: наприклад, за потенціалу -0,55 В струми дорівнювали 3,42 і 0,057 А/м<sup>2</sup>, відповідно, що відповідає більш довгій області активного розчинення. Тафелевський нахил на основному металі був вище, ніж на зварному шві – 0,025 і 0,014 В, відповідно. Можна припустити, що це свідчило про схильність зварного шва до більш легкого розчинення порівняно з ОМ. Аналізуючи закономірності анодного розчинення цього зварного з'єднання, висловлено припущення, що більш активна поведінка зварного шва може сприяти його локальній корозії.

Для перевірки цього припущення досліджували стійкість зварного з'єднання проти міжкристалітної корозії (МКК) згідно з ГОСТ 9.021 [6]. Для випробувань виготовляли зразки розміром 10×50×1 мм. Зразки знежирювали етиловим спиртом, піддавали травленню у розчині 10 % гідроксиду натрію за температури 50 °С та освітлювали у 25 % розчині азотної кислоти, промивали у проточній, потім у дистильованій воді та висушували фільтрувальним папером. Випробування проводили у скляних стаканах, розміщуючи зразки таким чином, щоб запобігти контактування їх один з одним. Склад робочого розчину: 30 г/л хлориду натрію, 10 мл/л соляної кислоти, густина розчину – 1,19 г/см<sup>3</sup>, тривалість випробувань – 24 год.

Після випробувань зразки промивали так, як описано вище, висушували фільтрувальним папером. Для оцінювання стійкості проти МКК використовували металографічний метод. Критерієм стійкості проти МКК є глибина руйнування границь зерен не більше, ніж на 0,350 мм. Шліфи досліджували при збільшенні ×320.

На рис. 3 наведено фото мікроструктури основного металу та зварного з'єднання сплаву системи Al-Mg-Cu-Si після випробувань стійкості проти МКК. З аналізу даних рисунку видно, що глибина руйнування зварного з'єднання (рис. 3, а) більша, ніж основного металу (рис. 3, б).



Основний метал



Зона сплавлення зварного з'єднання

Рис. 3. Мікроструктура основного металу та зварного з'єднання сплаву системи Al-Mg-Cu-Si після випробувань стійкості проти МКК,  $\times 320$

Таким чином, основний метал зварного з'єднання алюмінієвого сплаву В-1341Т системи Al-Mg-Cu-Si у стані поставки є стійкими проти міжкристалітної корозії – глибина руйнування становить від 0,062 до 0,111 мм. Зварне з'єднання сплаву В-1341Т, отримане вільною дугою, є не стійкими проти міжкристалітної корозії – глибина руйнування становить від 0,224 до 0,431 мм. За результатами електрохімічних досліджень відмічено більшу корозійну активність металу шва. Порівнюючи отримані результати, зроблено висновок про те, що існує кореляція між електрохімічними властивостями та стійкістю проти локальної корозії зон зварного з'єднання.

**Висновки.** Встановлено електрохімічну гетерогенність зварного з'єднання алюмінієвого сплаву В-1341Т системи Al-Mg-Cu-Si, яка проявляється у різній стійкості проти міжкристалітної корозії основного металу і металу шва. Підтверджено експериментально, що стійкість проти локальної корозії зон зварного з'єднання задовільно корелює з електрохімічними властивостями, а саме, з потенціалом корозії та струмом анодного розчинення в активній області потенціалів.

### Література

1. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. - М.: Металлургия. - 1979. - 398 с.
2. Арчакова З. Н., Балаховцев Г. А., Басова И. Г. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. - М.: Металлургия. - 1984. - 408 с.
3. Хэтч Дж. Е. Алюминий: свойства и физическое металловедение. Пер. с англ./ Под ред. Дж. Е. Хэтча. - М.: Металлургия, 1989. - 422 с.
4. Фридляндер И. Н., Систер В. Г., Грушко О.Е. Алюминиевые сплавы – перспективный материал в автомобилестроении // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2002. - №9. - С. 3 – 9.
5. Фридляндер И. Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. М.: Металлургия. - 1979. - 208 с.
6. Ищенко А. Я., Лабур Т. М. Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов. - Киев, Наукова думка. - 2013. - 416 с.

### References

1. Mondol'fo L. F. Struktura i svoystva alyuminiyevykh splavov. [Structure and properties of aluminum alloys] M.: Metallurgiya. - 1979. - 398 p.
2. Archakova Z. N., Balakhovtsev G. A., Basova I. G. Struktura i svoystva polufabrikatov iz alyuminiyevykh splavov. [Structure and properties of semi-finished products from aluminum alloys] M.: Metallurgiya. - 1984. - 408 p.
3. Khetch Dzh. Ye. Alyuminiy: svoystva i fizicheskoye metallovedeniye. [Aluminum: properties and physical metallurgical science] Per. s angl./ Pod red. Dzh.Ye.Khetcha. M.: Metallurgiya. - 1989. - 422 p.
4. Fridlyander I. N., Sister V. G., Grushko O. Ye. Alyuminiyevyye splavy – perspektivnyy material v avtomobilestroyenii [Aluminum alloys – perspective material in automotive industry] // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. [Metallurgical science and heat treatment of metals]. - 2002. - №9. P. 3 – 9.
5. Fridlyander I. N. Alyuminiyevyye deformiruyemye konstruktsionnyye splavy. [Aluminum deformable constructional alloys] M.: Metallurgiya. - 1979. - 208 p.
6. Ishchenko A. YA., Labur T. M. Svarka sovremennykh konstruktsiy iz alyuminiyevykh splavov [Welding of the modern designs from aluminum alloys]. - Kiev, Naukova dumka. - 2013. - 416 p.



7. Фам Хонг Фу. Совершенствование технологии термической обработки изделий из деформируемых алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si на основе выбора режимов охлаждения при закалке. – Дис. Канд. Техн. Наук. – [Место защиты: Московский государственный технический университет имени Н. Э Баумана], 2016. – 145 с.

8. Колобнев Н. И., Бер Л. Б., Хохлатова Л. Б. Структура, свойства и применение сплавов системы Al-Mg-Si-(Cu) // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2011. – № 9. – С. 40-45.

9. ГОСТ 9.021-74 Единая система защиты от коррозии и старения. Алюминий и сплавы алюминиевые. Методы ускоренных испытаний на межкристаллитную коррозию. – [Введен 1975-01-01]. – М.: Издательство стандартов. – 1978. – 4 с.

10. ГОСТ 9.005-72 Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, металлические и неметаллические неорганические покрытия. Допустимые и недопустимые контакты с металлами и неметаллами. [Введен 1973-07-01]. – М.: Издательство стандартов. – 2004. – 27 с.

7. Fam Khong Fu. Sovershenstvovaniye tekhnologii termicheskoy obrabotki izdeliy iz deformiruyemykh alyuminiyevykh spлавov sistemy Al-Mg-Si na osnove vybora rezhimov okhlazhdeniya pri zakalke. [Perfecting of technology of a heat treatment of products from deformable aluminum alloys of the Al-Mg-Si system on the basis of the choice of the modes of cooling when training] – Dis. Kand. Tekhn. Nauk. – [Mesto zashchity: Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet imeni N. E Baumana] – 2016. – 145 p.

8. Kolobnev N. I., Ber L. B., Khokhatova L. B. *Struktura, svoystva i primeneniye spлавov sistemy Al-Mg-Si-(Cu)* [Structure, properties and use of alloys of the Al-Mg-Si-(Cu) system] // *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. [Metallurgical science and heat treatment of metals] – 2011. – № 9. – P. 40 – 45.

9. GOST 9.021-74 *Yedinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Alyuminiy i splavy alyuminiyevyye. Metody uskorenykh ispytaniy na mezhkristallitnyuyu korroziyu* [Unified system of corrosion and aging protection. Aluminum and alloys aluminum. Methods of accelerated tests on intercrystalline corrosion]. – [Entered 1975-01-01]. – M.: Standards publishing house. – 1978. – 4 p.

10. GOST 9.005-72 *Yedinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Metally, splavy, metallicheskiye i nemetallicheskiye neorganicheskiye pokrytiya. Dopustimyye i nedopustimyye kontakty s metallami i nemetallami* [Unified system of corrosion and aging protection. Metals, alloys, metal and nonmetallic inorganic coating. Admissible and inadmissible contacts with metals and nonmetals]. – [Entered 1973-07-01]. – M.: Standards publishing house. – 2004. – 27 p.

**NYRKOVA LYUDMILA**

lnyrkova@gmail.com

ResearcherID: 6506092726

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3917-9063>

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kiev, department of welding of oil and gas pipes

**BORYSENKO YULIYA**

boria95@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1639-0205>

Department of Electrochemical Power Engineering & Chemistry

Kyiv National University of Technologies & Design

**LABUR TATIANA**

tanyalabur@gmail.com

ResearcherID: 6506343754

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv, department of «Physical and metallurgical processes of welding light metals and alloys»

## КОРРЕЛЯЦИЯ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Mg-Cu-Si И ЕГО УСТОЙЧИВОСТЬ К ЛОКАЛЬНОЙ КОРРОЗИИ НЫРКОВА Л. И. \*, ЛАБУР Т. М. \*, РЯБИКО О. М. \*\*, БОРИСЕНКО Ю. В. \*\*

\*Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины

\*\*Киевский национальный университет технологий и дизайна

**Цель.** Исследование корреляции между электрохимическими свойствами сварного соединения алюминиевого сплава системы легирования Al-Mg-Cu-Si и его стойкостью против локальной коррозии.

**Методика.** Использовали методы потенциометрии, поляризационных кривых, ускоренные испытания стойкости против межкристаллитной коррозии по ГОСТ 9.913. Применяли такие средства измерительной техники: весы аналитические ВРЛ 200, потенциостат ПИ-50.1.

**Результаты.** Изучены электрохимические свойства в растворе 3% NaCl сварного соединения алюминиевого сплава системы легирования Al-Mg-Cu-Si, полученного свободной дугой, оценена его стойкость против межкристаллитной коррозии. Результатами электрохимических исследований установлено, что потенциал сварного шва и зоны термического влияния являются более

благородными по сравнению с основным металлом. Учитывая большую площадь основного металла в конструкции по сравнению со сварным швом (площадь сварного шва составляет не более 10% от площади основного металла) в целом можно ожидать удовлетворительную стойкость сварного соединения к сплошной коррозии. Максимальная глубина межкристаллитной коррозии околошовной зоны сварного соединения сплава Al-Mg-Cu-Si составляет около 0,350 мкм, что больше, чем для основного металла - около 0,086 мкм. Увеличение глубины разрушения границ зерен в сварном соединении подтверждает факт разупрочнения околошовной зоны при сварке.

**Научная новизна.** Установлена корреляция между электрохимическими характеристиками сварного соединения алюминиевого сплава системы легирования Al-Mg-Cu-Si, полученного свободной дугой, в частности, потенциалом коррозии и током анодного растворения в активной области потенциалов и стойкостью против межкристаллитной коррозии. Показано, что увеличение глубины межкристаллитной коррозии околошовной зоны коррелирует с большими токами анодного растворения зоны.

**Практическая значимость.** Установлено, что термический цикл сварки способствует разупрочнению околошовной зоны сварного соединения, полученного свободной дугой, алюминиевого сплава системы легирования Al-Mg-Cu-Si, что приводит к снижению стойкости против межкристаллитной коррозии.

**Ключевые слова:** алюминиевый сплав системы легирования Al-Mg-Cu-Si, сварное соединение, электрохимические свойства, межкристаллитная коррозия.

## CORRELATION BETWEEN ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF THE WELDED JOINT OF ALUMINIUM ALLOY OF THE AL-MG-CU-SI SYSTEM AND ITS RESISTANCE TO LOCAL CORROSION

NYRKOVA L. I.<sup>\*</sup>, LABUR T.M.<sup>\*</sup>, RIABYKO O. M.<sup>\*\*</sup>, BORYSENKO Yu. V.<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Ye.O. Paton Electric-Welding Institute of the NAS of Ukraine

<sup>\*\*</sup>Kyiv National University of Technology and Design

**Purpose.** The study of the correlation between the electrochemical properties of a welded joint of an aluminum alloy of the Al-Mg-Cu-Si alloying system and its resistance against local corrosion.

**The technique.** Potentiometry, polarization curves techniques, accelerated tests of resistance against intergranular corrosion according to GOST 9.913 were used. The measuring equipment analytical VRRL 200 scales, potentiostat PI-50.1 was applied.

**Results.** Electrochemical properties in a solution of 3% NaCl of a welded joint of an aluminum alloy of the Al-Mg-Cu-Si alloying system obtained by a free arc were studied, its resistance against intergranular corrosion was evaluated. In accordance with the results of electrochemical studies it have established that the potential of the weld and the heat-affected zone are more noble in comparison with the base metal. Taking into account the larger area of the base metal in the structure in compare to the weld (the weld area is no more than 10% of the base metal area), in general, satisfactory resistance of the welded joint to uniform corrosion can be expected. The maximum depth of intergranular corrosion of the heat-affected zone of the welded joint of the Al-Mg-Cu-Si alloy is about 0.350  $\mu\text{m}$ , which is more than the depth of intergranular corrosion for the base metal — about 0.086  $\mu\text{m}$ . The increasing of the depth of breaking down of grain boundaries in a welded joint confirms the fact of the softening of the heat-affected zone during welding.

**Scientific novelty.** A correlation between the electrochemical characteristics of the welded joint of an aluminum alloy of the Al-Mg-Cu-Si alloying system obtained by a free arc, in particular, the corrosion potential and the anodic dissolution current in the active potential region and resistance against to intergranular corrosion was established. It is shown that an increasing of the depth of intergranular corrosion of the heat-affected zone correlates with the large currents of the anodic dissolution of this zone.

**Practical significance.** It has been established that the thermal welding cycle promotes the weakening of the heat-affected zone of the welded joint of an aluminum alloy of the Al-Mg-Cu-Si alloying system, obtained by a free arc. It leads to a decreasing of the resistance against intergranular corrosion.

**Keywords:** aluminum alloy of the Al-Mg-Cu-Si alloying system, welded joint, electrochemical properties, intergranular corrosion.